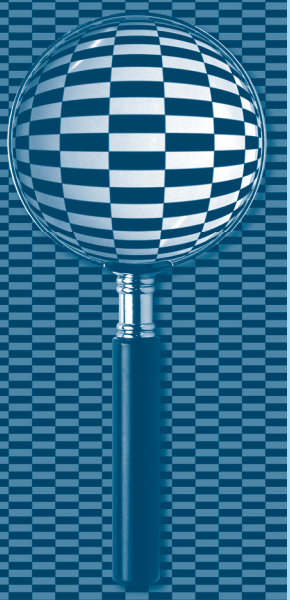
ISBN 978-3-7388-0738-7

Bauforschung T 3395



Lia Weiler, Anya Vollpracht

Bewertung des Auslaugverhaltens von Schaumglasschotter

Fraunhofer IRB | Verlag

Bauforschung

Lia Weiler, Anya Vollpracht

T 3395

Bewertung des Auslaugverhaltens von Schaumglasschotter

Fraunhofer IRB | Verlag

T 3395

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2022

ISBN 978-3-7388-0738-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB | Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Institut für Bauforschung und Lehrstuhl für Baustoffkunde

RWTH AACHEN UNIVERSITY

FORSCHUNG
ENTWICKLUNG
ÜBERWACHUNG
PRÜFUNG
BERATUNG

www.ibac.rwth-aachen.de

Forschungsbericht

F 7123

Bewertung des Auslaugverhaltens von Schaumglasschotter

Institut für Bauforschung und Lehrstuhl für Baustoffkunde

RWTH AACHEN UNIVERSITY

THEMA	Bewertung des Auslaugverhaltens von Schaumglasschotter
Forschungsbericht-Nr.	F 7123 vom 26.11.2021
Projektbearbeitung	Lia Weiler, M.Sc. Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht
Auftraggeber/Förderer	Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)
Vertragsdatum / Auftragsbestätigung	07.05.2021
Ihr Aktenzeichen	P 52-5-20.103-2074/21

Dieser Bericht umfasst 29 Seiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung. Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des Lehrstuhls.

Lehrstuhl für Baustoffkunde
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Matschei
Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht

Postfach, 52056 Aachen
Schinkelstraße 3, 52062 Aachen
Deutschland / Germany

Telefon +49 (0) 241 80-9 51 00
Telefax +49 (0) 241 80-9 21 39
www.ibac.rwth-aachen.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 2
2 Material und Methoden 4
2.1 Ausgangsmaterialien 4
2.2 Schütteltests 6
3 Ergebnisse der Schütteltests 7
4 Literaturrecherche zu Einbauszenarien 12
4.1 Vorbemerkung 12
4.2 Systematik der EBV 12
4.3 Einbauweisen 13
4.3.1 Übersicht 13
4.3.2 Geschlossener Einbau – SGS g 15
4.3.3 Wasserdurchlässiger Einbau – SGS w 15
4.3.4 Teildurchsickerter Einbau – SGS t 16
5 Fazit 21
6 Literaturverzeichnis 21
Anhang A – Tabellen 23
Anhang B – Bilder 24

1 Einleitung

Schaumglasschotter (SGS) ist ein mineralischer Dämmsstoff mit lastabtragenden Eigenschaften, der aus Altglas hergestellt wird. Zur Herstellung von Schaumglasschotter wird in der Regel zunächst das Altglas durch den Altglassammler gereinigt (je nach Unternehmen gewaschen und anschließend von Fremdstoffen befreit) und daraufhin an Glasmühlen verkauft. Diese verarbeiten das Altglas zu Glasmehl, welches wiederum an die jeweiligen Schaumglashersteller geliefert wird. Wenige Schaumglashersteller stellen ihr Glasmehl in Eigenproduktion her.[1]

Das Glasmehl wird mit einem Additiv, z. B. $CaCO_3$ / $MgCO_3$ / Dolomit, $C_3H_8O_3$, SiC oder Ruß, als Kohlenstoffträger und Blähmittel versetzt und auf 800°C – 1000°C erhitzt /Hül10, Van14/. Für Altglasscherben wird nach /Hül10/ vorwiegend das Glycerol-Wasserglas-Verfahren verwendet, bei welchem zum Beispiel eine Mischung aus Alkalibentonit, Wasserglas und Glycerol eingesetzt wird /Vie80/.

Das Glaspulver wird zunächst gesintert und mit dem zugesetzten Kohlenstoffträger verbunden, welcher sich bei weiterer Erwärmung zersetzt und ggf. mit Sauerstoff aus den im Glas oder in weiteren Additiven (z.B. Fe_2O_3, MnO_2) enthaltenen Oxiden zu CO_2 oxidiert[1] /Hül10, Van14/. Die entstehenden Gasbläschen sorgen für das Aufschäumen der Glasschmelze zum sogenannten Schaumglaskuchen, welcher kontrolliert abgekühlt und somit zum Schaumglas wird /Hül10/. Während des Oxidationsprozesses entstehen durch die Reduktion der Oxide auch leichter lösliche Schwermetallverbindungen (Mn, As, Cr, Fe, Cu), welche bei Wasserkontakt auslaugen können[1].

Da Schaumglasschotter aus dem Abfallprodukt „Altglas“ hergestellt wird, muss das Material gemäß den "Grundsätzen zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser - Fassung 2011“ (DIBt-Grundsätze) auf auslaugbare Substanzen geprüft und eine Bewertung der Auswirkungen auf Boden und Grundwasser durchgeführt werden. Zwar ist der Anwendungsbereich von Schaumglasschotter, u. a. als lastabtragende Wärmedämmung unter Gründungsplatten, auf Bereiche oberhalb des Grundwassers begrenzt, es ist somit kein dauerhafter Wasserkontakt gegeben, durch Sickerwasser oder auch im Falle eines Hochwasserereignisses kann jedoch eine Auslaugung stattfinden.

Im Rahmen der Zulassungsuntersuchungen werden die Feststoffwerte nach Königswasseraufschluss gemäß DIN EN 13657 sowie die Eluatwerte gemäß DIN EN 12457-4 am eingesetzten Glasmehl ermittelt. Dies entspricht einer Bewertung nach Stufe 1 der DIBt-Grundsätze: Der Ermittlung und Bewertung aller relevanten Inhaltsstoffe unter Berücksichtigung des Abfallrechts.

[1] Persönliche Auskunft, Hersteller-Telefonat am 17.03.21

In Stufe 2 (Ermittlung und Bewertung der mobilisierbaren Inhaltsstoffe) erfolgt eine Untersuchung des Schaumglasschotters im Säulenversuch nach DIN 19528.

Ergebnisse aus ~ 300 Stichproben der werkseigenen Produktionskontrolle und der Fremdüberwachung zeigen wiederholt Überschreitungen der derzeit zulässigen Obergrenzen der Tabelle A-7 der MVV TB 2020/2 /DIB20/, die den Z1-Werten (Feststoff) bzw. den Z1.2-Werten (Eluat) der TR Boden, 2004 /LAG04/, entsprechen. Häufige Überschreitungen von ≥ 20 % der Proben sind dabei im Feststoff bei Blei und Kupfer sowie in den Eluaten bei Arsen, Kupfer und Quecksilber zu beobachten /DIB21/.

Da der Schaumglasschotter im Anwendungsfall nur im Randbereich von Sickerwasser durchströmt werden kann und durch die Prüfung des Glasmehls die Oberfläche vergrößert wird, stellt sich die Frage, ob die derzeitige Art der Prüfung beziehungsweise die Bewertung angemessen ist.

Anstelle des Glasmehls, welches in dieser Form ohnehin nicht eingesetzt wird, könnten auch Glasscherben im Elutionsversuch geprüft werden. Da nach Abfallrecht die in Verkehr gebrachte Korngrößenverteilung zu untersuchen und keine Vorzerkleinerung der zu verwertenden Abfälle vorgegeben ist, wurde der Einfluss der Korngröße auf die Eluatkonzentrationen ermittelt.

In Anbetracht des geringen Gefährdungspotentials in der vorgesehenen Einbauweise kann auch das Prüf- und Bewertungsverfahren für Schaumglasschotter überarbeitet werden. Die kürzlich verabschiedete Ersatzbaustoffverordnung /EBV21/ sieht sogenannte medienschutzbasierte Einbauwerte vor, welche die Einbauweise sowie die Umgebungsbedingungen berücksichtigen. Auf Grundlage einer Literaturauswertung bzgl. vergleichbarer Einbauszenarien aus dem Bereich der Ersatzbaustoffverordnung wird hierzu ein Vorschlag erarbeitet.

2 Material und Methoden

2.1 Ausgangsmaterialien

Es wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Glasmehle dreier Schaumglashersteller sowie zwei Altgläser eines Schaumglasherstellers und einer Glasmühle, welche als Zulieferer für Schaumglashersteller fungiert, untersucht.

Tabelle 1: Übersicht über Probenmaterialien

Probe	Größtkorn in mm	Farbe	Prüfung
Altglas G	31,5	grün	Siebung, Schütteltest
Altglas B	16	blau / weiß	
Glasmehl G	0,163	weiß / gelblich	Korngrößenverteilung mittels Lasergranulometrie
Glasmehl W	0,211	weiß / leicht gräulich	
Glasmehl H	0,211	hellgrau	

Bild 1 zeigt die im Schütteltest geprüften Materialen, welche bereits optisch eine deutlich unterschiedliche Zusammensetzung erkennen lassen. In beiden Gemischen befanden sich Papier- und Aluminiumetikettenreste sowie weitere Verunreinigungen (Sand- / Papierfaser- / Kleinstoffgemisch (G), Kunststoffschnipsel (G), Feuchtigkeit (B / G)). Das Altglas wird nach Angabe der Hersteller jedoch in diesem Zustand in der Mühle aufgegeben und dementsprechend für die Schaumglasherstellung verwendet.

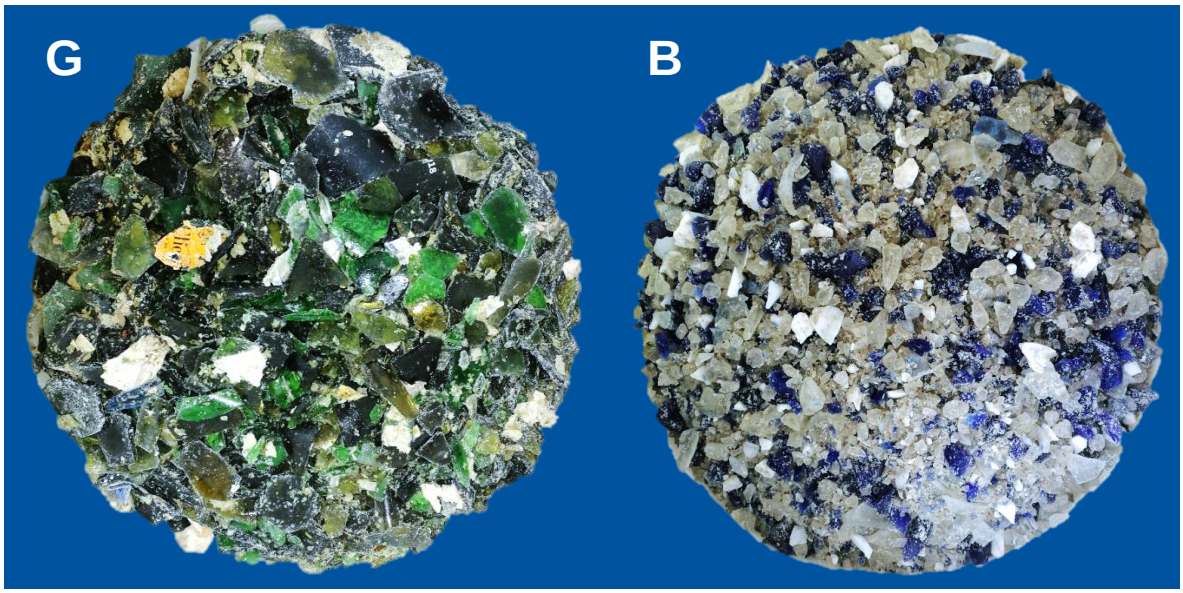


Bild 1: Ausgangsstoff Altgläser G und B

Es wurden beide Glasgemische zunächst im Originalzustand der Laborprobe sowie darauffolgend in aus der Originalprobe hergestellten Körnungen sowie in aufbereitetem Zustand unter-

sucht. Zusätzlich wurden die Feststoffgehalte der Originalproben nach Königswasseraufschluss bestimmt. Die Probenteilung erfolgte repräsentativ gemäß DIN EN 932-2 über einen Riffelteiler. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die hergestellten Prüfproben.

Tabelle 2: Prüfproben für den Schütteltest in Anlehnung an die DIN EN 12457-4

Altglasprobe	Version 1	Version 2	Version 3
G	Original *(G)*	gebrochen auf D/2 *($G_{D/2}$)*	gebrochen auf D/10 *($G_{D/10}$)*
B	Original *(B)*	aufbereitet *($B_{S>2}$)*	aufbereitet und gemahlen auf < 125 µm *($B_{S<125}$)*

Für Probe G wurde mittels Siebung über Normsiebe nach DIN EN 933-1 das Größtkorn D ermittelt. In einem Backenbrecher wurden daraufhin zwei Fraktionen mit dem Größtkorn D/2 sowie D/10 hergestellt. Hierbei wurde das Material möglichst schonend gebrochen, um das Entstehen einer erhöhten Feinfraktion zu vermeiden.

Aus der Ausgangsprobe B wurden eine aufbereitete, sowie eine aufbereitete und gemahlene Fraktion hergestellt. Hierfür wurde ein Teil der Laborprobe zunächst bei 40 °C für 24 h getrocknet (1,15 M.-%) und im Anschluss der Feinanteil < 2 mm (16,8 M.-%) abgesiebt. Zwei optisch erkennbare Etikettenteile, welche nicht mit den Glasscherben verbunden waren, wurden aus der Fraktion 2 / 16 aussortiert. Aufgrund der Geringfügigkeit wurde der Massenanteil nicht bestimmt.

Die Probe zur Prüfung im gemahlenen Zustand sollte auf eine typische Glasmehlfeinheit eingestellt werden. Es wurde darum die Mahlfeinheit der in Bild B1 bis Bild B3 dargestellten Glasmehle bestimmt und ein Wert von D < 125 µm abgeleitet. Die aufbereitete Probe B wurde dementsprechend in einer Scheibenschwingmühle aus Wolframcarbid auf eine Korngröße < 125 µm gemahlen; es ergibt sich die in Bild B 4 ausführlich und in Bild 2 vergleichend abgebildete Korngrößenverteilung zur Prüfung im Schütteltest.

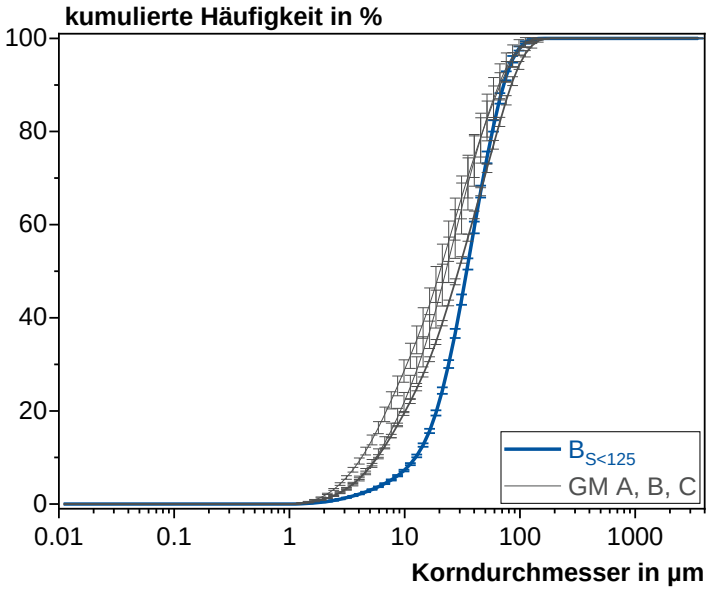


Bild 2: Korngrößenverteilung der gemahlenen, aufbereiteten Altglasprobe $B_{S<125}$ im Vergleich zu bereitgestellten Glasmehlen

2.2 Schütteltests

Die Schütteltests wurden an den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Proben in Doppelbestimmung in Anlehnung an die DIN EN 12457-4 mit einem Wasser zu Feststoff Verhältnis (W/F) von 10 L/kg durchgeführt. Abweichend zur genannten Norm wurde, in Absprache mit dem Auftraggeber, keine Korngrößenreduzierung auf < 10 mm durchgeführt.

Jeweils 90 g der Probe wurden in 1 L PE-Flaschen eingewogen, mit 900 ml deionisiertem Wasser beaufschlagt und für 24 h Stunden bei 5 U/min in einem Überkopfschüttler geschüttelt. Nach diesen 24 h wurden die Flaschen dem Überkopfschüttler entnommen und die Probe für 15 min absetzen lassen, dekantiert und durch einen 0.45 µm PE-Filter filtriert.

An einem Teil des erzeugten Eluat wurden umgehend der pH-Wert sowie die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Ein weiterer Teil wurde in 50 ml PE-Röhrchen gefüllt und mit 2 Vol.-% 65-%iger, analysereiner HNO_3 stabilisiert. Bis zur Elementanalyse (Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink) mittels ICP-MS erfolgte die Lagerung bei 4 °C.

3 Festoffgehalte der Ausgangsproben

In Tabelle 3 sind die für die Altglasscherben ermittelten Feststoffwerte den Grenzwerten nach MVV TB /DIB20/ gegenübergestellt. Alle relevanten Parameter liegen deutlich unter den maximal zulässigen Gehalten.

Tabelle 3: Feststoffgehalt der Altglasscherben nach Königswasseraufschluss

Element	G	B	Grenzwert nach /DIB20/
	mg/kg		
As	< 0,8	< 0,8	20
Pb	< 2	< 2	80
Cd	< 0,2	0,3	3
Cr	4	4	180
Cu	< 1	2	60
Ni	2	2	20
Hg	< 0,07	< 0,07	1
Zn	< 1	14	200

4 Ergebnisse der Schütteltests

Die Abbildungen Bild 3 bis Bild 7 zeigen die Ergebnisse der Schütteltests nach DIN EN 12457-4 im Vergleich zum in rot eingezeichneten Grenzwert nach MVV TB 2020/2, Anhang 10, Tabelle A-7, bzw. dem zulässigen Bereich nach LAGA Z1.2 für Boden im Fall von pH und elektrischer Leitfähigkeit. Die Zahlenwerte sind Tabelle A1 und A2 zu entnehmen.

Anhand des pH-Werts und der elektrischen Leitfähigkeit ist zu erkennen, dass eine erhöhte Oberfläche durch Brechen bzw. Mahlen bei beiden Altglasproben zu einer höheren Freisetzung von Substanzen führt (s. Bild 3). Wider Erwarten zeigt die aufbereitete und von der Feinfraktion befreite Probe $B_{S>2}$ eine erhöhte Leitfähigkeit im Vergleich zur Originalprobe.

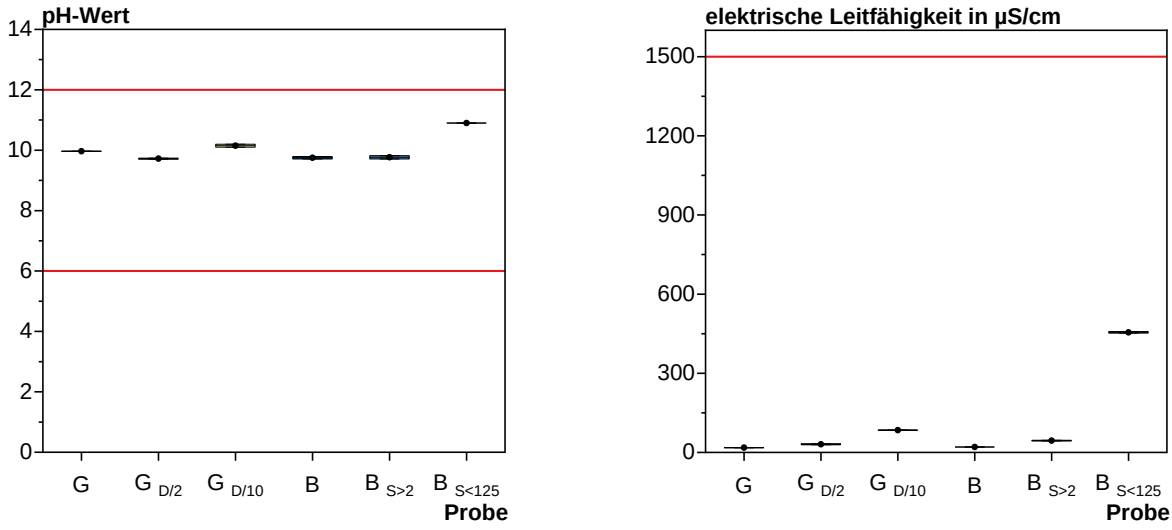


Bild 3: pH-Werte (links) und elektrische Leitfähigkeiten (rechts) der Schütteltesteluate (W/F = 10, Doppelbestimmung) im Vergleich zu den Grenzwerten nach MVV TB

Die Eluatkonzentrationen von Arsen und Blei liegen für beide Gläser in der gleichen Größenordnung und bei allen Versuchen unter den Grenzwerten der MVV TB. Bei beiden Glasgemischen ist ein deutlicher Einfluss der Korngröße auf die Arsenauslaugung zu beobachten (s. Bild 4, links). Im Durchschnitt setzt das Glasmehl hier etwa das 12-fache der ungemahlenen Probe frei.

Für die Bleifreisetzung der Probe G lässt sich die steigende Freisetzung mit abnehmender Korngröße aufgrund der Streuung des Originalmaterials nicht ebenso verlässlich erkennen, wie bei Probe B; es ist jedoch auch hier ein Trend vorhanden (s. Bild 4, rechts).

Wie die Messung der Leitfähigkeit bereits vermuten lässt, führte die gewählte Aufbereitung des Materials nicht zu einer verringerten Stofffreisetzung.

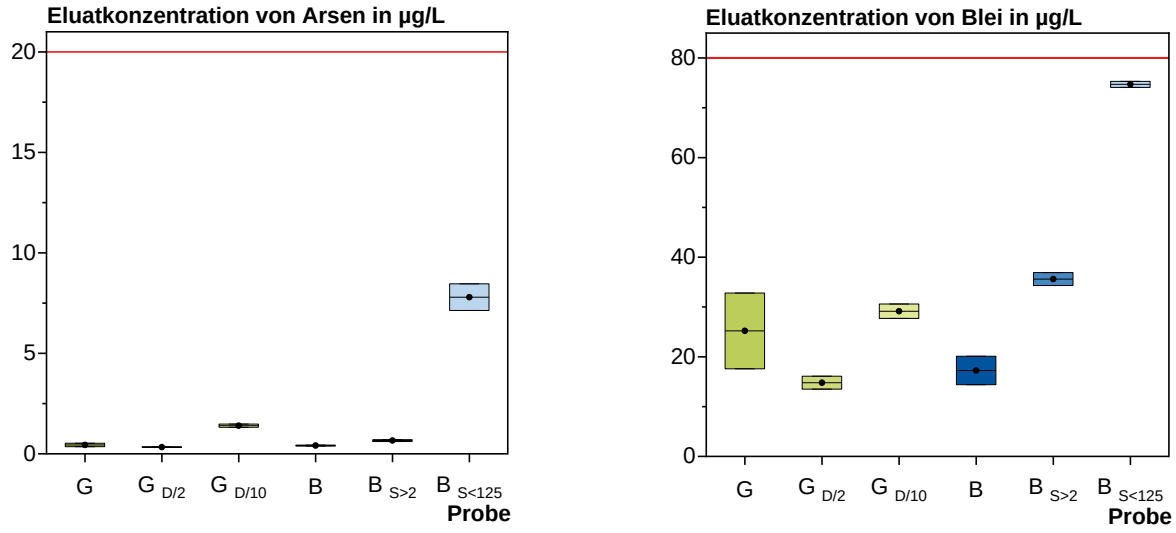


Bild 4: Arsen- und Bleikonzentrationen der Schütteltesteluate (W/F = 10, Doppelbestimmung) im Vergleich zu den Grenzwerten nach MVV TB

Auch die Schwermetalle Cadmium und Chrom werden mit abnehmender Korngröße zunehmend freigesetzt (s. Bild 5). Während die Original-Altglasproben unterhalb der Grenzwerte der MVV TB liegen, treten bei den Varianten der Probe B Überschreitungen für Cadmium und bei Probe $G_{D/10}$ für Chrom (etwa die sechsfache Konzentration der Originalprobe) auf.

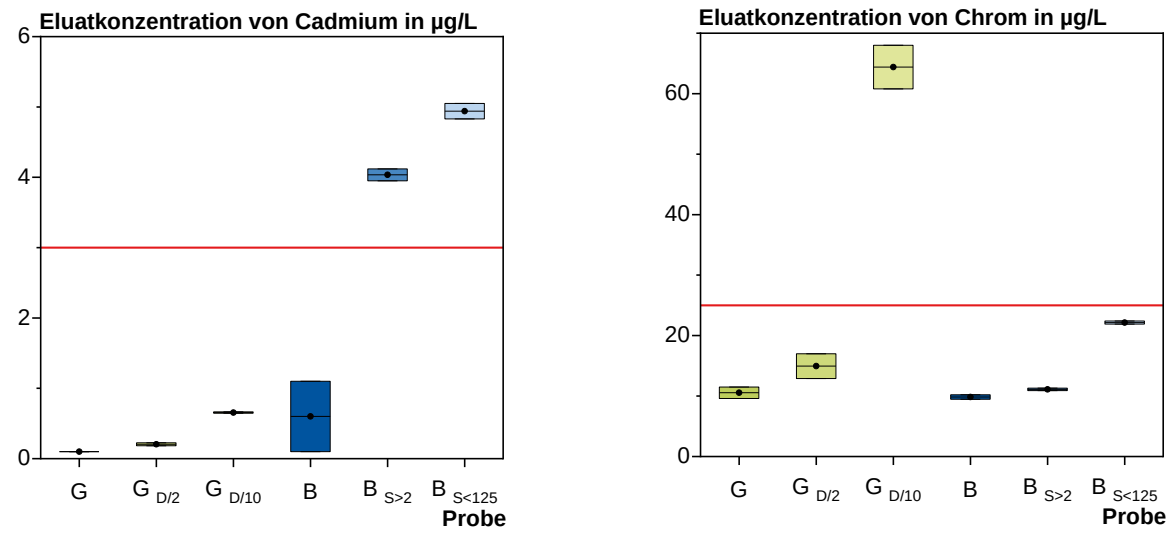


Bild 5: Cadmium- und Chromkonzentration der Schütteltesteluate (W/F = 10, Doppelbestimmung) im Vergleich zu den Grenzwerten nach MVV TB

Die Eluatkonzentrationen von Kupfer und Nickel liegen im Grenzwertbereich, teilweise liegt jeweils ein Einzelwert über bzw. unter dem Grenzwert (s. Bild 6). Alle Original-Altglasproben halten das Limit für Kupfer ein. Beide Elemente werden in der gleichen Größenordnung aus beiden Altglasmischungen ausgelaugt, zeigen eine zu anderen Elementen vergleichsweise starke

Streuung und scheinen relativ unabhängig von der Korngröße ausgelaugt zu werden. Die Durchschnittswerte der Glasmehlprobe $B_{S<125}$ sind im Vergleich zur Probe $B_{S>2}$ für Kupfer nicht signifikant erhöht, für Nickel ergibt sich ein Faktor von lediglich 1,2. Auch die Probe G lässt bei Zerkleinerung auf D/2 bzw. D/10 keine systematischen Unterschiede erkennen.

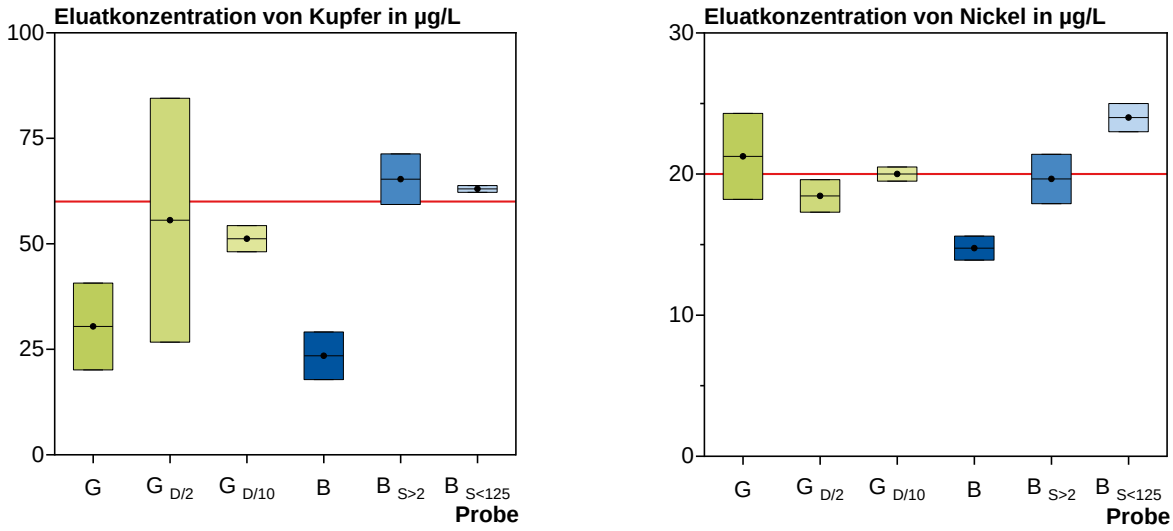


Bild 6: Kupfer- und Nickelkonzentration der Schütteltesteluate (W/F = 10, Doppelbestimmung)

Quecksilber, als eines der in den vorliegenden Untersuchungen des DIBt identifizierten problematischen Elemente, zeigt eine deutliche Resonanz auf die Korngrößenreduktion. Während alle Glasscherben-Proben deutlich unter dem Grenzwert liegen, übersteigt das Glasmehl diesen um 100 % (s. Bild 7, links).

Zink wird aus der Probe G in zulässigen Mengen ausgelaugt, die Korngröße zeigt einen Einfluss auf die Eluatkonzentration. Probe B bestätigt diesen Einfluss; mit der 2,5-fachen Konzentration der zwar unzerkleinerten, jedoch bereits grenzwertüberschreitenden Probe $B_{S>2}$, liegt die Zinkauslaugung hier deutlich über dem Grenzwert der MVV TB (s. Bild 7, rechts).

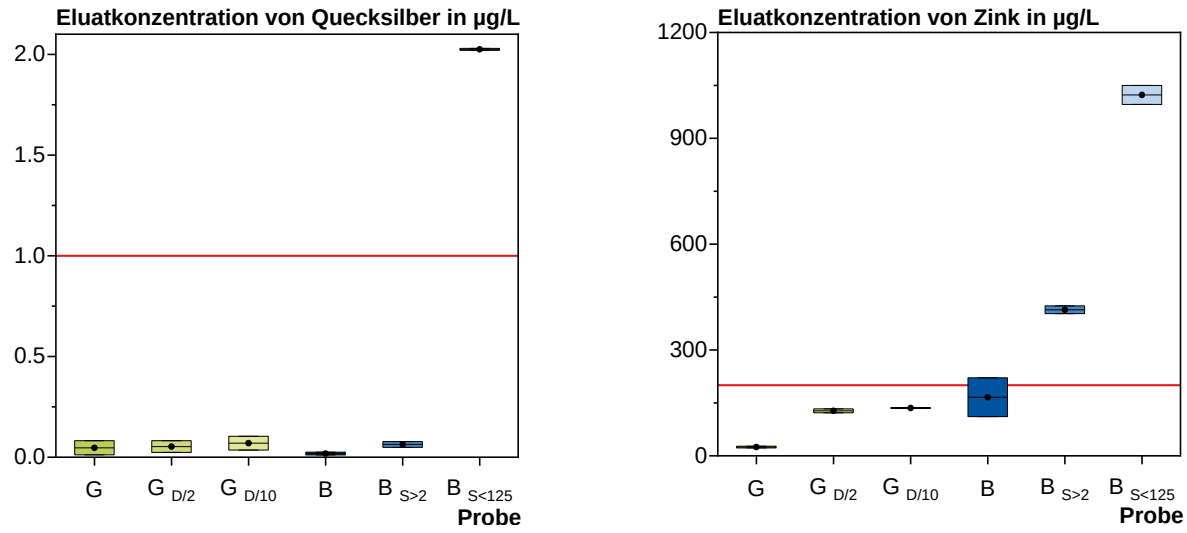


Bild 7: Quecksilber- und Zinkkonzentration der Schütteltesteluate (W/F = 10, Doppelbestimmung)

Bei zusammenfassender Betrachtung aller Schütteltestergebnisse lässt sich feststellen, dass eine Überprüfung der Altglasscherben anstelle des Glasmehls erwartungsgemäß zu geringeren Eluatkonzentrationen führen würde. Insbesondere die Eluatkonzentrationen der „Problemelemente“ Arsen und Quecksilber könnten auf etwa 1/10 im Vergleich zu Glasmehl gesenkt werden. Dennoch würde diese Vorgehensweise nicht die Einhaltung der Grenzwerte garantieren. Insbesondere dann, wenn ein Auslaugversuch mit der in DIN EN 12457-4 vorgeschriebenen Korngrößenzerkleinerung auf < 10 mm (vgl. $G_{D/10}$ < 3,1 mm und $B_{S<125}$ < 0,125 mm) vorgenommen wird, sind den Ergebnissen der Versuche dieser Arbeit zufolge, Überschreitungen für Chrom, Kupfer und Nickel, unter Umständen auch Cadmium und Zink zu erwarten. Für eine belastbarere Aussage wären weitere Versuche zur Validierung der beobachteten Tendenzen empfehlenswert.

Die Trocknung und Aufbereitung (Absiebung des Feinanteils und Aussortieren von Fremdbestandteilen) der Glasscherben vor der Elution verringerte entgegen der Erwartung nicht die gemessenen Eluatkonzentrationen. Hier könnten Adsorptionseffekte der Elemente an den feineren Partikeln eine Erklärung sein.

Die Ausschleusung möglicherweise unbelasteter Partikel mit der Feinfraktion wird aufgrund des, im Vergleich zum Effekt geringen, Feinanteils von ~17 % für unwahrscheinlich gehalten. Die massenbezogene Freisetzung war um 12 – 350 % , durchschnittlich 120 % im Vergleich zur Originalprobe erhöht.

5 Literaturrecherche zu Einbauszenarien

5.1 Vorbemerkung

Alternativ zur Änderung des Prüfverfahrens der DIBt-Grundsätze, könnte auch für Stufe 2 ein anderes Bewertungsverfahren, welches das Einbauszenario von Schaumglasschotter berücksichtigt, in Betracht gezogen werden. Hierfür wird ein Vorgehen analog der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) vorgeschlagen.

5.2 Systematik der EBV

Das Bewertungskonzept der EBV basiert auf Ergebnissen von 44 Forschungs- und Entwicklungsvorhaben der BMBF-Fördermaßnahme „Sickerwasserprognose“ /EBV21/, aus welchen im Rahmen des UBA – UFOPLAN Vorhabens „Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes „Sickerwasserprognose“ in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden“ ein wissenschaftliches Fachkonzept entwickelt wurde, welches Stoffeigenschaften mit zulässigen Einbauweisen verknüpft /Sus11/.

Die am 11.06.2021 verabschiedete Verordnung zur Einführung der Ersatzbaustoffverordnung soll damit die bestmögliche Verwertung von mineralischen Abfällen im Sinne des § 6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) bei gleichzeitiger Sicherung und Wiederherstellung der Funktionen des Bodens im Sinne des § 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) gewährleisten /EBV21/. Zu diesem Zweck sind Grenzwerte für den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerke sowie das Auf- oder Einbringen von Materialien auf oder in den Boden jeweils für unterschiedliche Szenarien abgleitet worden; Schaumglasschotter ließe sich hier ggf. einordnen.

Die einzuhaltenden Grenzwerte beziehen sich auf die kumulierte Konzentration aus einem Säulenkurztest nach DIN 19528 (2009) bei einem Wasser-Feststoffverhältnis (W/F) von W/F = 2; diese Konzentration soll eine gemittelte Konzentration nach 10 bis 50 Jahren (abhängig von der Bauwerksmächtigkeit) abbilden. Über Transportsimulationen wurde ermittelt, welche maximale Konzentration dauerhaft möglich ist, ohne dass der angesetzte Bezugsmaßstab innerhalb von 200 Jahren überschritten wird. Als Bezugsmaßstab (BM) für die Bewertung des Eluats gilt, sofern nicht bereits durch die natürliche Hintergrundkonzentration überschritten, die Einhaltung der Geringfügigkeitsschwellen nach LAWA (GFS) /LAW17/ am unteren Ende der betrachteten Bodenschicht, oberhalb des Grundwasserleiters /EBV21/.

Die Simulation des Stoffabbaus und des Sickerwassertransports im Boden erfolgt zwar stoff- und bodenspezifisch unterschiedlich (z. B. keine Berücksichtigung eines Rückhalts, dafür jedoch eines Abklingverhaltens für Salze), ist jedoch für die Einbauszenarien gleich. Die zu erwartende

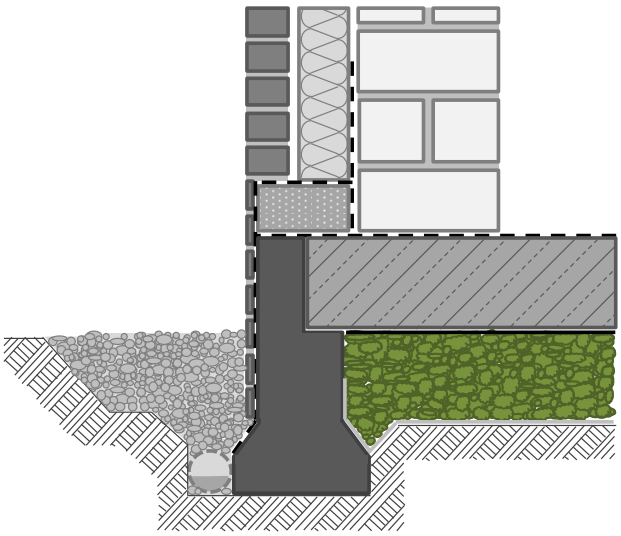
Infiltration und Durchströmung technischer Bauwerke zur Ermittlung der Sickerwasserrate wurde anhand unterschiedlicher Szenarien modelliert, welche z. B. Verdünnungsfaktoren bei teildurchströmten Bauwerken berücksichtigen /Bey07/. Die zulässigen Konzentrationen sind somit abhängig von der Einbauweise, aber auch dem Abstand zum Grundwasser, dem Untergrund (Sand oder Lehm/Ton/Schluff) sowie dem Schutzziel (z. B. Wasserschutzgebiet) /Sus11/. Es ergeben sich sogenannte „medienschutzbasierte Einbauwerte“, welche, je nach Anwendung, unterschiedlich hohe Eluatkonzentrationen für ein Material als zulässig einstufen.

5.3 Einbauweisen

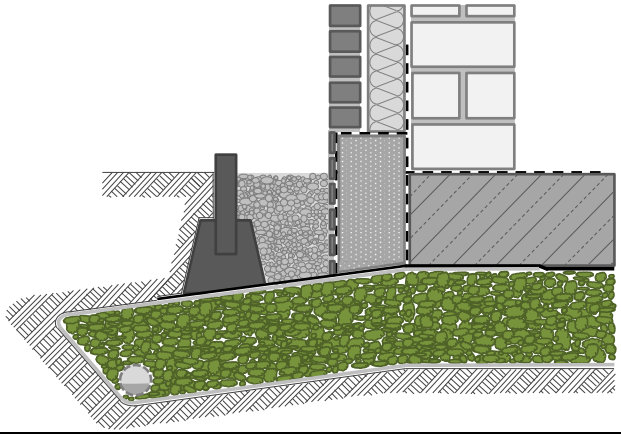
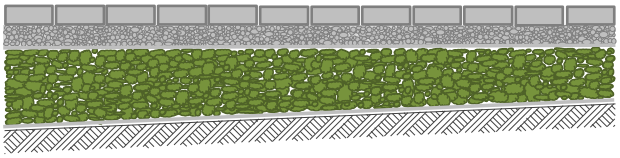
5.3.1 Übersicht

Die in der Ersatzbaustoffverordnung modellierten Einbauszenarien unterscheiden sich insbesondere in ihrer Durchlässigkeit sowie der Sickerwasserverteilung über das Bauwerk. In Tabelle 4 sind die Einbauszenarien der EBV aufgeführt und die typischen Einbauweisen für Schaumglasschotter den jeweils ähnlichsten Einbauszenarien der EBV gegenübergestellt.

Tabelle 4: Einbauweisen der EBV im Vergleich zu typischen Schaumglasschotteranwendungen

Einbauweise EBV		Skizze der entsprechenden Einbauweise für SGS	SGS Nr.
1	Decke bitumen- oder hydraulisch gebunden, Tragschicht bitumengebunden		**SGS g**
2	**Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht**		
3	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln unter gebundener Deckschicht		
4	Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter gebundener Deckschicht		
5	Asphalttragschicht (teilwasserdurchlässig) unter Pflasterdecken und Plattenbelägen, Tragschicht hydraulisch gebunden (Dränbeton) unter Pflaster und Platten		
6	**Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung**		

Fortsetzung Tabelle 3: Einbauweisen der EBV im Vergleich zu typischen Schaumglasschotteranwendungen

7	**Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht**		**SGS t**
8	Frostschutzschicht (ToB), Baugrundverbesserung und Unterbau bis 1 m ab Planum jeweils unter gebundener Deckschicht	–	
9	Dämme oder Wälle gemäß Bauweisen A-D nach MTSE sowie Hinterfüllung von Bauwerken im Böschungsbereich in analoger Bauweise	–	
10	Damm oder Wall gemäß Bauweise E nach MTSE		
11	**Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen**		**SGS w**
12	Deckschicht ohne Bindemittel		
13	**ToB, Baugrundverbesserung, Bodenverfestigung, Unterbau bis 1m Dicke ab Planum sowie Verfüllung von Baugruben und Leitungsgräben unter Deckschicht ohne Bindemittel**		
14	Bauweisen 13 unter Plattenbelägen		
15	Bauweisen 13 unter Pflaster		
16	Hinterfüllung von Bauwerken oder Böschungsbereich von Dämmen unter durchwurzelbarer Bodenschicht sowie Hinterfüllung analog zu Bauweise E des MTSE		
17	Dämme und Schutzwälle ohne Maßnahmen nach MTSE unter Durchwurzelbarer Bodenschicht	–	

5.3.2 Geschlossener Einbau – SGS g

Die Einbauweisen der Nummern 1-6 und 9 aus Einbautabellen der EBV stellen einen geschlossenen Einbau dar. Da das Material hier in, bzw. unter, gebundenen Deckschichten, oder anderen abdichtenden Maßnahmen eingebaut wird, ist der Sickerwasserzutritt vernachlässigbar und eine medienschutzbasierte Beurteilung entsprechend nicht vorgesehen /Sus18/. Die in der EBV charakterisierten Materialien können hier, mit wenigen Ausnahmen, uneingeschränkt eingebaut werden.

Die Nummern 2 „Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatten, Bodenverfestigung unter gebundener Deckschicht“ sowie 6 „Bettung, Frostschutz- oder Tragschicht unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung“ ähneln der Einbauweise einer Perimeterdämmung aus Schaumglasschotter. Wird kein Schaumglasschotterüberstand für den Frostschutz, sondern eine klassische Frostschürze ausgeführt, befindet sich die Schüttung i.d.R. vollständig unter der Bodenplatte und ist vertikal baulich vom Erdreich getrennt (vgl. Tabelle 4).

Wollte man Schaumglasschotter analog dem System der EBV bewerten, wäre nach einem Vergleich der Eluatwerte aus dem Säulenversuch von SGS nach DIN 19528 /DIB21/ mit den Eluatwerten der Materialwerte für die aufgeführten Kategorien der EBV ein solcher Einbau in allen Fällen zulässig.

5.3.3 Wasserdurchlässiger Einbau – SGS w

Die für unterschiedliche Einbauweisen jeweils zulässige Quelltermkonzentration setzt sich aus den GFS beziehungsweise BM als Basiswert, einem Verhältnismäßigkeitsfaktor von 1,5 sowie möglichen Verdünnungsfaktoren zusammen. Diese Verdünnungsfaktoren können aus der Geometrie und Infiltrationsrate des Bauwerks, dem für den jeweiligen Stoff charakteristischen Emissionsverhalten sowie der Rückhaltefunktion des darunter anstehenden Bodens resultieren.

In jedem Fall gilt die Einhaltung der GFS- bzw. BM- Werte multipliziert mit dem festgelegten Verhältnismäßigkeitsfaktor von 1,5 im Säulenkurzeluat bei W/F = 2 als sichere Abschätzung für den ungünstigsten Fall eines Einbaus in einem Abstand von 0,1-1 m Abstand zum Grundwasser.

In wasserdurchlässiger Einbauweise (Tabelle 4, SGS w) sowie als sichere Abschätzung bei einem Einbau von Schaumglasschotter als Tragschicht unter einer Bodenplatte mit Überstand der Schotterschicht (Tabelle 4, SGS t) könnte man diesen BM-Wert, unter der Annahme, dass die gesamte Schüttung, d. h. die SGS-Schicht unter der Bodenplatte und der überstehende SGS-Streifen, gleichmäßig durchsickert wird und auslaugt, als Maßstab zur Sicherstellung der Umweltverträglichkeit des Materials verwenden.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse von Säulenkurzversuchen an 28 Proben aus der werkseigenen Produktionskontrolle und Fremdüberwachungen von Schaumglasschotter /DIB21/ im Vergleich zu den GFS der LAWA sowie den Bezugsmaßstäben der EBV. 50 % der Werte innerhalb des 95. Perzentils der kumulierten, gemittelten Konzentrationen der Säulenversuche bei einem W/F = 2 übersteigen die GFS-Werte, halten den 1,5-fachen Bezugsmaßstab der EBV jedoch größtenteils ein. Arsen und Quecksilber, als problematisch bekannte Schwermetalle, überschreiten sowohl die GFS als auch den Bezugsmaßstab der EBV deutlich.

Tabelle 5: Vergleich der GFS und BM der EBV mit vorliegenden Ergebnissen aus Säulenkurzversuchen an Schaumglasschotter, kumulierte Konzentration bei W/F = 2

Parameter	GFS /LAW17/	BM /Sus18/	BM·1,5	95. Perzentil der Messwerte SGS /DIB21/
	µg/L			
Arsen	3,2	8	12	66,2
Blei	1,2	23	34,5	28,2
Cadmium	0,3	2	3	0,4
Chrom	7	10	15	2,8
Kupfer	5,4	20	30	15,9
Nickel	7	20	30	6,3
Quecksilber	0,1	0,1	0,15*	0,2
Zink	60	100	150	10,0

*Quecksilber ist in der EBV für RC-Baustoffe in Form eines Feststoffgrenzwertes berücksichtigt, der Wert der GFS wird daher als BM angesetzt und mit Faktor 1,5 multipliziert.

Insbesondere die maximal gemessenen Eluatwerte des Schaumglasschotters von Arsen (71 µg/L), Quecksilber (0,2 µg/L) und Blei (35 µg/L) überschreiten die Anforderungen der EBV für einen Einbau im ungünstigsten Fall. Durch Berücksichtigung der Einbauweise (Geometrie, Infiltrationsrate) sowie des Stofftransportes in der Bodenschicht, ist jedoch die Anwendung weiterer Verdünnungsfaktoren möglich, welche im Folgenden näher betrachtet werden sollen.

5.3.4 Teildurchsickerter Einbau – SGS t

5.3.4.1 Generelle Vorgehensweise bei der Ableitung der zulässigen Quelltermkonzentration

Die Einbauweisen 7,8,10, 16 und 17 der Einbautabellen der EBV beziehen sich auf teildurchsickerte Bauwerke. Hierzu zählen Straßendämme mit gebundenen Deckschichten (z. B. Asphalt- oder Betondecke) und Sicherungsmaßnahmen, die eine Teildurchströmung der Böschungsbe-

reiche aufweisen. Da in diesen Szenarien nicht der vollständige eingebaute Ersatzbaustoff mit Sickerwasser in Kontakt tritt, werden zur medienschutzbasierten Beurteilung Verdünnungs- bzw. Mittelungsfaktoren angewandt, um die die Quelltermkonzentration erhöht sein darf.

Einbauweise 7 „Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht“ (ToB: Tragschicht ohne Bindemittel) entspricht dem Einbau von Schaumglasschotter als Tragschicht unter einer Bodenplatte mit Überstand der Schotterschicht (s. Tabelle 4) am ehesten. Für dieses weitestgehend wasserundurchlässige Einbauszenario wird die Infiltration im Bankett- und Böschungsbereich bewertet und theoretisch durch das Abflusswasser der undurchlässigen Schicht verdünnt. Dabei fällt bei der Mittelung über das Gesamtbauwerk jedoch kein zusätzliches Verdünnungswasser an, es wird die Kleinräumigkeit der Böschung bezogen auf das Gesamtbauwerk berücksichtigt /Sus11/. Das der Einbauweise 7 zugrundeliegende Modell „Straßendamm mit Frostschutzschicht/Tragschicht aus Recyclingbaustoff“ ist in Bild 8 exemplarisch dargestellt /Bey07/.

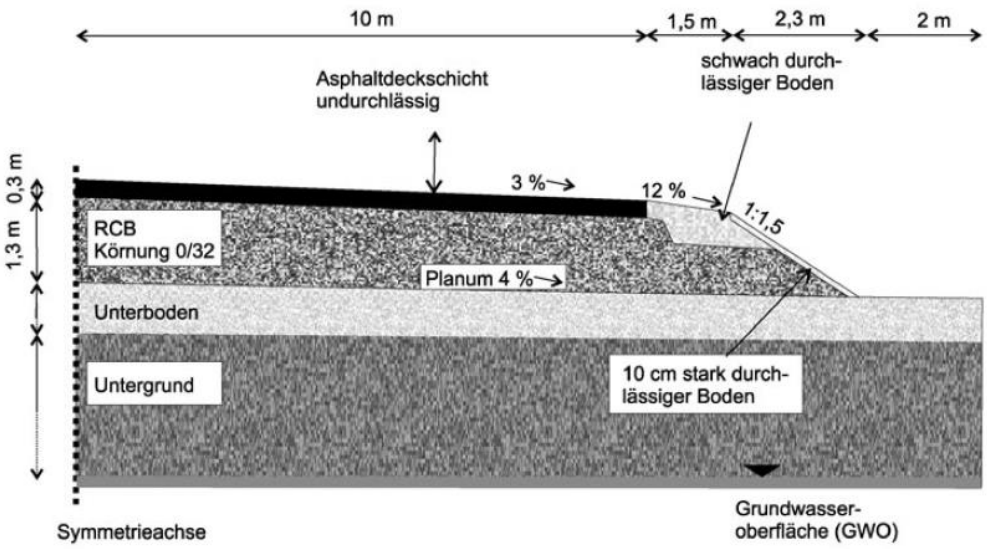


Bild 8: Abmessungen Straßendamm mit Frostschutzschicht / Tragschicht aus Recyclingbaustoff /Bey07/

Im Zuge der Weiterentwicklung der EBV wurden das Gefälle angepasst, sowie die Abmessungen des Bankett- und Böschungsbereiches auf 3,96 m geändert, das Bewertungsprinzip bleibt jedoch unverändert /Sus18/. Die Stoffkonzentration im Sickerwasser an der Unterkante der Einbauschicht wird auf die gesamte infiltrierende Wassermenge, sowie die gesamte Bauwerksbreite bezogen (s. Gleichung (1)). Diese Mittelung führt zusammen mit dem Verdünnungseffekt zu einem für jede Einbauweise spezifischen Quelltermfaktor, der mit dem Bezugsmaßstab sowie dem Verhältnismäßigkeitsfaktor 1,5 multipliziert wird, um die zulässige Eluatkonzentration zu berechnen. Der Quelltermfaktor F_{QT} wird aus dem Verdünnungsfaktor berechnet durch:

$$F_{QT} = \frac{1}{VF} \cdot \frac{w_{FB}+w_{BB}}{w_{FB}} \quad (1)$$

F_{QT} Quelltermfaktor

VF Verdünnungsfaktor

w_{FB} Breite der Fahrbahn

w_{BB} Breite des Böschungsbereiches

5.3.4.2 Verdünnungsfaktor VF

In dem in Bild 8 dargestellten Beispiel wird die mittlere infiltrierende Wassermenge von 1803 mm/a zur späteren Modellierung der Strömung im Bauteil als Summe des Oberflächenabflusses der Asphaltdecke (Normalniederschlag von 859 mm/a · Abflussbeiwert von 0,7) sowie des auf Bankett und Böschung auftreffenden Niederschlags (859 mm/a) abzüglich der Evapotranspiration errechnet /Fin20/.

Die durch Beyer et al. durchgeführte Finite-Elemente-Strömungsmodellierung zeigt, dass diese Wassermenge im Bankettbereich gleichmäßig versickert und im Böschungsbereich vorwiegend abläuft. Hier konzentriert sich die Infiltration aufgrund eines Kapillarsperreneffekts zwischen feinkörniger Deckschicht und Ersatzbaustoff auf den Fuß des Damms. Da so eine Teilmenge des Ersatzbaustoffes keinen, bzw. sehr geringen, Wasserkontakt hat, ergibt sich ein Verdünnungsfaktor für die Durchbruchskonzentration von 0,098 [2], was eine um den Faktor 10,2 erhöhte Quelltermkonzentration erlaubt /Sus18/.

Das Szenario „Straßendamm“ trifft im Ansatz auch auf das Szenario SGS t „Schaumglasschottertragschicht“ (Tabelle 4) zu.

Hier ragen etwa 50 – 100 cm einer etwa 30 cm dicken, groben Schüttung, welche unter einem Vlies und/ oder einer feinkörnigeren Deckschicht liegt, unter der wasserundurchlässigen Bodenplatte heraus. Es handelt sich somit um eine teildurchsickerte Bauweise, bei welcher unter Umständen auch ein Kapillarsperreneffekt zu erwarten ist. Susset et al. betonen, dass die für die EBV verwendeten Verdünnungsfaktoren aufgrund der Abhängigkeit der Ausbildung einer Kapillarsperre von Neigung und Länge der Fläche, Eigenschaften der Materialien und Höhe des Wasserflusses nur für die modellierten Geometrien, Randbedingungen und Materialkombinationen quantitativ gültig sind /Sus11/. Ein direkter Übertrag des Verdünnungsfaktors aus dem Szenario „Straßendamm“ auf das Szenario „SGS t“ ist daher nicht möglich. Geometrien und Bauma-

[2] Die Wassermenge wird zur Berechnung des Faktors gleichmäßig über die Fläche des Banketts und der Böschung versickert. /Bey07/

terialien, deren Eigenschaften auf das Ausbilden von Kapillarsperren hin ausgerichtet werden, können jedoch prinzipiell die Infiltration in den Ersatzbaustoff und somit den Austrag von Schadstoffen in das Grundwasser reduzieren /Sus11/.

5.3.4.3 Kleinräumige Mittelung über das Bauwerk

Betrachtet man, unabhängig von der Ausbildung einer Kapillarsperre, analog den Szenarien der EBV lediglich die Mittelung der Konzentration über das Bauwerk; d.h. berücksichtigt man die Kleinräumigkeit des Schotterstreifens in Bezug auf die Gesamtschüttung, kann eine vielfach erhöhte Quelltermkonzentration zugelassen werden.

Für den Mittelungseffekt im Straßendammszenario nach EBV ergibt sich ein Faktor von $\frac{w_{FB}+w_{BB}}{w_{FB}}$ = $\frac{10+3,96}{3,96}$ = 3,5, um den die Quelltermkonzentration erhöht sein darf, dies entspricht einem Anteil von 28,4 % des Bauwerkes, welcher durchsickert wird.

Im Einbauszenario SGS t des Schaumglasschotters gelangt, je nach Größe des Bauwerks, ein noch geringerer Anteil in Wasserkontakt. Bei einem Überstand von 0,5 m auf 100 m² Grundfläche als Beispiel für ein Wohnhaus, werden z. B. 17,4 %, bei 80 m² Grundfläche 20 % infiltriert. Tabelle 6 zeigt beispielhaft mögliche Faktoren auf, um die der Quellterm erhöht werden dürfte, wenn der Überstand der Schaumglasschotterschüttung 0,5 m bzw. 1 m breit ist.

Tabelle 6: Beispielszenarien zur Ermittlung eines Verdünnungsfaktors analog der EBV für den Einbau von Schaumglasschotter als lastabtragende Wärmedämmung unter einem Wohnhaus mit quadratische Grundfläche und seitlichem Überstand der Schaumglasschotterschüttung

Grundfläche Wohnhaus	Breite des Überstands	Fläche des Überstands	„geometrischer“ Verdünnungsfaktor	**Quelltermfaktor***
m²	m	m²	-	**-**
49	0,5	7,25	0,13	**7,8**
81		9,25	0,10	**9,8**
100		10,25	0,09	**10,8**
121		11,25	0,09	**11,8**
49	1	15	0,23	**4,3**
81		19	0,19	**5,3**
100		21	0,17	**5,8**
121		23	0,16	**6,3**

*F_{QT} ohne VF

Die Mittelung über die Geometrie ergäbe, je nach Bauwerkgrundfläche und Überstand einen Faktor von 4,3 bis 11,8, um welchen die Quellkonzentration erhöht sein dürfte.

Tabelle 7 zeigt beispielhaft die zulässigen Maximalkonzentrationen für einen Quelltermfaktor von 4,3 im Vergleich zu den im Säulenkurzversuch an Schaumglasschotter ermittelten Konzentrationen im W/F = 2 Eluat. Es wird ersichtlich, dass, wenn die Werte der EBV als Maßstab herangezogen werden, ein Einbau von Schaumglasschotter bereits ohne Berücksichtigung einer möglichen Kapillarsperrenausbildung des offen eingebauten Materials als weitestgehend unproblematisch bewertet werden kann. Die Freisetzung von Arsen muss bei kleinen Grundflächen mit breitem Überstand (F_{QT} < 5,5) noch kritisch betrachtet werden.

Tabelle 7: Zulässige Maximalkonzentrationen bei F_{QT} = 4,3 im Vergleich zu Messwerten aus dem W/F = 2 Säulenkurzeluat von Schaumglasschotter.

Parameter	BM·1,5	BM·1,5·F_{QT}	95. Perzentil der Messwerte SGS /DIB21/
	µg/L		
Arsen	12	52	66,2
Blei	34,5	148	28,2
Cadmium	3	13	0,4
Chrom	15	65	2,8
Kupfer	30	129	15,9
Nickel	30	129	6,3
Quecksilber	0,15	0,65	0,2
Zink	150	645	10,0

5.3.4.4 Quelltermfaktor

Im Straßendammszenario der EBV (Nr.7, Tabelle 4) ergibt sich, aus dem Mittelungsfaktor ergänzt um den Verdünnungsfaktor aus der Modellierung ein Quelltermfaktor von F_{QT} =3,5 · 10,2 = 36, um den die Quelltermkonzentration erhöht sein darf /Fin20, Sus11, Sus18/. Dieser Quelltermfaktor wird zur Errechnung der zulässigen Einbauweisen in der EBV herangezogen. So gilt z. B. für Arsen ein Bezugsmaßstab von 8 µg/L. Als zulässige Quelltermkonzentration (diese entspricht ohne Berücksichtigung der Bodenzone, d.h. unter ungünstigen Bedingungen, dem Medienschutzbasierten Einbauwert, MEB) für die Einbauweise 7 der EBV bei ungünstigen Bodenbedingungen ergibt sich ein Wert von 8 µg/L · 1,5 · 36 = 432 µg/L /Sus18/.

Um auch für das Schaumglasschotterszenario zusätzlich einen Verdünnungsfaktor anzusetzen, müsste die Geometrien des Bauwerks festgelegt und der erwartete Abfluss abgeschätzt werden. Auf dieser Basis müsste eine Sickerwasserrate analog /Bey07/ errechnet und das Durchströmungsverhalten modelliert werden.

6 Fazit

Die Bewertung der Altglasscherben anstelle des Glasmehls wird voraussichtlich weniger Materialien vom Einsatz ausschließen. Insbesondere die wesentlich niedrigeren Eluatkonzentrationen von Arsen und Quecksilber im Schütteltest an den Scherben tragen hierzu bei. Die Prüfung von Altglasscherben anstelle des Glasmehls garantiert die Grenzwertunterschreitungen jedoch nicht. Zusätzlich sollte bedacht werden, dass die Zuständigkeit der Produkthersteller größtenteils auf die Rohstofflieferanten übertragen werden würde, da nur wenige Schaumglashersteller eine eigene Glasmühle betreiben.

Da Schaumglasschotter vorwiegend unter Gründungsplatten eingebaut wird, wurde darum auch die Möglichkeit einer Bewertung analog dem Vorgehen der Ersatzbaustoffverordnung vorgestellt. In dieser werden bei der Bewertung der Eluatwerte die Bauwerksgeometrie und die Durchsickerung der Schaumglasschotterschicht berücksichtigt. Für den Einbau ließe die Berücksichtigung dieser Faktoren einen geschlossenen und aller Voraussicht nach auch einen teilweise durchsickerten Einbau zu.

7 Literaturverzeichnis

/Bey07/ Beyer, C.; Konrad, W.; C.H., P.; Bauer, S.; Grathwohl, P.; Rügner, H.; Liedl: Model based prognosis of contaminant leaching for reuse of demolition waste in construction projects. In: Grundwasser 2 (2007) S. 94–107. DOI:10.1007/s00767-007-0025-x

/DIB20/ DIBt: Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) (11/2020)

/DIB21/ DIBt: interne Auswertung von Daten der wPK + FÜ von Schaumglasschotter, Stand 04.11.2021

/EBV21/ Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, Bundesgesetzblatt 2021, Teil I Nr.43, Bonn 16.06.2021 , S.2598-2752

/Fin20/ Finkel, M.; Susset, B.; Grathwohl: Evaluierung der Bewertungsverfahren im Kontext mit der Verwertung mineralische Abfälle in/auf Böden, UBA Texte 53/2020, Dessau-Roßlau (2020) S. 180

/LAG04/ LAGA: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Teil II: Technische Regeln für die Verwertung 1.2 Bodenmaterial (TR Boden), Stand: 05.11.2004

/Hül10/ Hülsenberg, D.: Schaumglas, Thieme Gruppe (2010)

/LAW17/ Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Stuttgart (01/2017) S. 28

/Sus11/ Susset, B.; Grathwohl, P.: Leaching standards for mineral recycling materials--a harmonized regulatory concept for the upcoming German Recycling Decree. In: Waste Management 2 (2011) S. 201–214. DOI:10.1016/j.wasman.2010.08.017

/Sus11/ Susset, B.; Leuchs, W.: Ableitung von Materialwerten im Eluat und Einbaumöglichkeiten mineralischer Ersatzbaustoffe - Umsetzung der Ergebnisse des BMBF-Verbundes „Sickerwasserprognose“ in konkrete Vorschläge zur Harmonisierung von Methoden, UBA Texte 04/2011, Dessau-Roßlau (02/2011) S. 124

/Sus18/ Susset, B.; Maier, U.; Finkel, M.; Grathwohl, P.: Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge, UBA TEXTE 26/2018 (2018) S. 479

/Van14/ Vancea, C.; Lazău, I.: Glass foam from window panes and bottle glass wastes. In: Open Chemistry 7 (2014) S. 804–811. DOI:10.2478/s11532-014-0510-x

/Vie80/ Vieli, O. A. (1980): Blähmittel zur Erzeugung von Schaumglas aus Glasmehl und Verfahren zu dessen Herstellung (0011597) Europäisches Patentamt.

Anhang A – Tabellen

Tabelle A1: Eluatwerte im Schütteltest an Altglas G (grün)

Parameter	Einheit	G		$G_{D/2}$		$G_{D/10}$	
		a	b	a	b	a	b
pH	-	9,96	9,97	9,74	9,70	10,2	10,1
el. Leitfähigkeit	µS/cm	18,3	17,9	28,9	32,9	84,0	84,6
Arsen	µg/L	0,524	0,354	0,316	0,346	1,32	1,48
Blei		32,8	17,6	13,5	16,1	27,7	30,6
Cadmium		**2,34**	0,1	0,183	0,225	0,665	0,646
Chrom		11,5	9,6	12,9	17	60,8	68
Kupfer		40,7	20,1	26,7	84,5	48,1	54,3
Nickel		24,3	18,2	17,3	19,6	19,5	20,5
Quecksilber		0,0817	0,0118	0,0237	0,0820	0,0357	0,104
Zink		221	27,4	122	133	134	137

fettgedruckt: Ausreißerverdächtiger Wert

Tabelle A2: Eluatwerte im Schütteltest an Altglas B (blau / weiß)

Parameter	Einheit	B		$B_{S>2}$		$B_{S<125}$	
		a	b	a	b	a	b
pH	-	9,79	9,71	9,82	9,71	10,9	10,9
el. Leitfähigkeit	µS/cm	20,3	20,5	43,2	46,1	458	452
Arsen	µg/L	0,382	0,431	0,614	0,705	7,13	8,46
Blei		14,4	20,1	36,9	34,3	75,3	74,1
Cadmium		<0,1	1,1	4,12	3,95	5,05	4,83
Chrom		9,47	10,2	11,3	10,9	22,4	21,9
Kupfer		17,8	29,1	71,3	59,3	62,2	63,8
Nickel		13,9	15,6	17,9	21,4	25,0	23,0
Quecksilber		0,011	0,0249	0,0491	0,0776	2,03	2,02
Zink		22,3	111	425	403	996	1050

Anhang B – Bilder

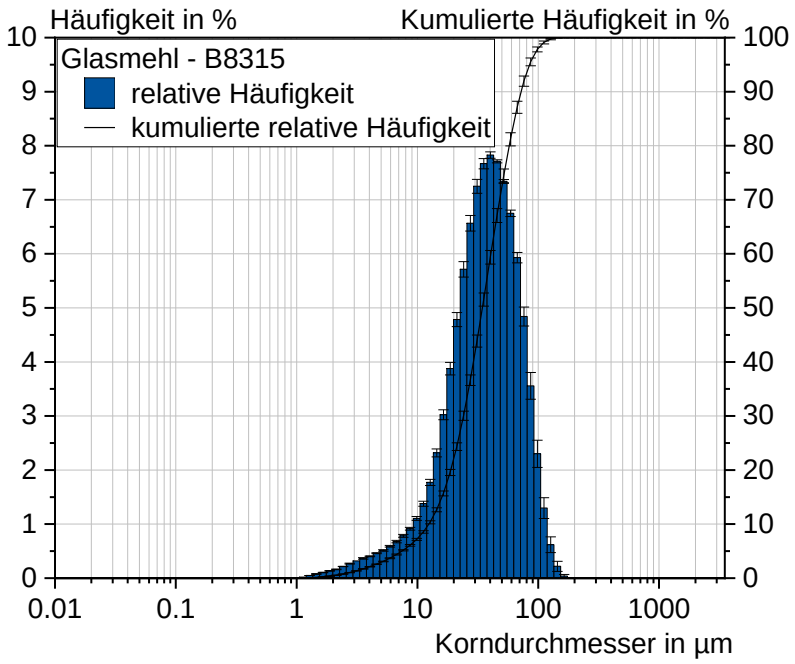


Bild B1: Korngrößenverteilung des bereitgestellten Glasmehls G

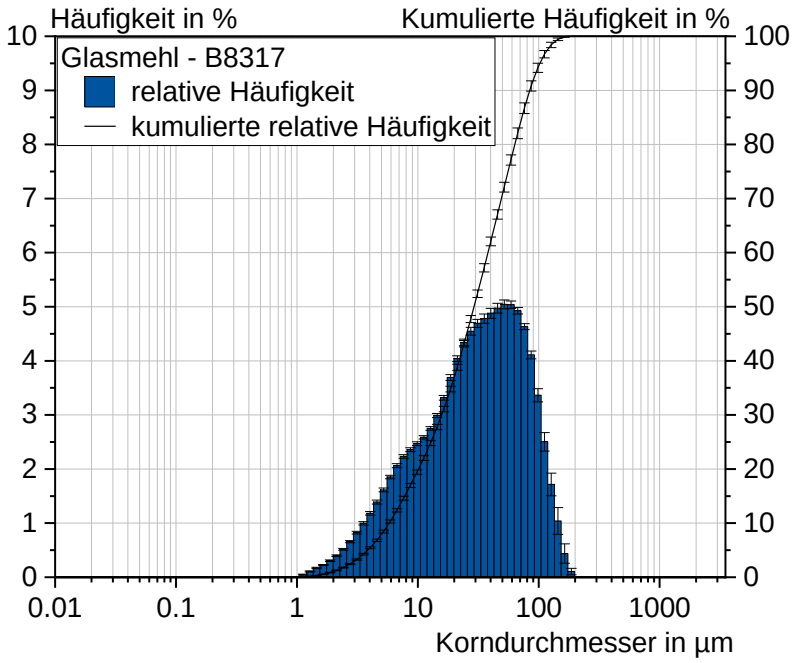


Bild B2: Korngrößenverteilung des bereitgestellten Glasmehls W

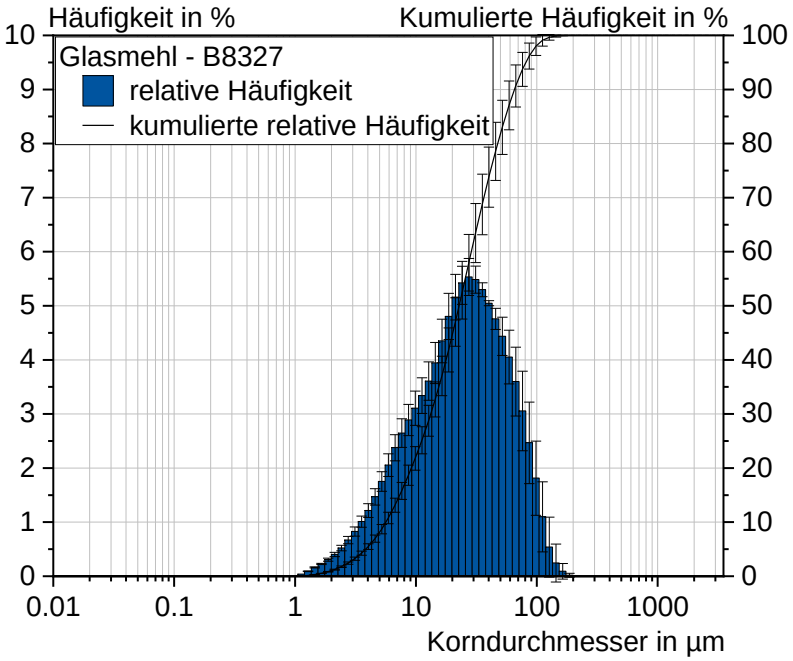


Bild B3: Korngrößenverteilung des bereitgestellten Glasmehls H

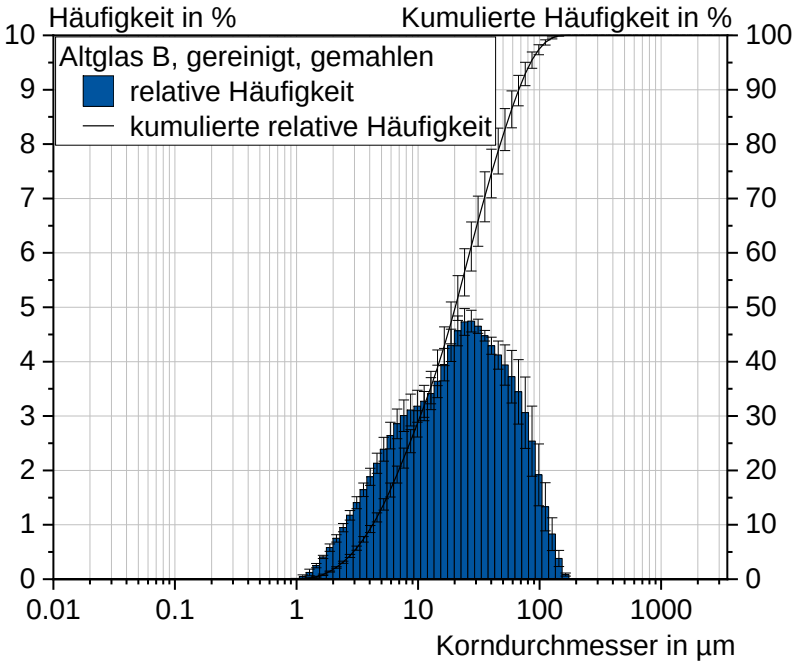


Bild B 4: Korngrößenverteilung der gemahlenen, aufbereiteten Altglasprobe $B_{S<125}$